

[文章编号] 1007-7405(2014)03-0173-06

生态综合养殖池塘氮磷沉积研究

黄红宣¹, 胡雪怡², 吴维鹏³, 李倨莹³

(1. 漳州卫生职业学院药系, 福建 漳州 363000; 2. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361102; 3. 厦门大学环境与生态学院, 福建省海陆界面生态环境重点实验室, 滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 福建 厦门 361102)

[摘要] 通过使用沉积物捕获器获取沉积物, 研究了一生态综合养殖池塘的沉积作用, 并利用室内模拟实验研究了缢蛏(*Sinonovacula constricta*)的生物沉积作用, 同时分析了池塘沉积物及其间隙水的营养盐; 应用 Fick 第一定律对池塘沉积物-池水界面营养盐通量进行了估算. 藻类池颗粒物质的日平均沉积速率为 44.59 g/m^2 , 贝类池颗粒物质的日平均沉积速率为 14.01 g/m^2 ; 两个池塘试验期内(90 d) N、P 的净沉积量分别为 6061.5 g 和 3411 g (采样池塘面积各 0.5 hm^2 , 水深 50~60 cm). 结果显示实验期内生态综合养殖池塘沉积作用分别占 N、P 营养元素输出的 2.2% 和 5.8% (质量分数).

[关键词] 生态综合养殖; 总氮; 总磷; 沉积

[中图分类号] P 736.4

[文献标志码] A

Deposition Analysis of Nitrogen and Phosphorus in an Integrated Multi-trophic Aquaculture Pond

HUANG Hong-xuan¹, HU Xue-yi², WU Wei-peng³, LI Ju-Ying³

(1. Department of Pharmacy, Zhangzhou Health Vocational College, Zhangzhou 363000, China; 2. College of Ocean & Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 3. College of the Environment & Ecology, Fujian Provincial Key Laboratory for Coastal Ecology and Environmental Studies, Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: Deposition in aquaculture areas of an Integrated Multi-trophic Aquaculture (IMTA) Pond in Yunxiao and Zhangzhou was studied by sediment traps which were used to collect sediment. By studying the biodeposition of *Sinonovacula constricta* by indoor simulation experiments, and analysing the amount of $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ of the overlying and interstitial water in the IMTA Pond at the same time. The fluxes of dissolved inorganic N, P from the sediments were estimated by the Fick's first law. The estimation results show that the average daily deposition rate of particulate of the algae pool is 44.59 g/m^2 , while in the shellfish pool the data is 14.01 g/m^2 . The total net deposition of N and P in the experimental period (90 d) is 6061.5 g and 3411 g (pool area is 0.5 hm^2 ; pool depth is 50~60 cm). The results show that the nutrient N and P contributed by seepage took part about 2.2% and 5.8% of the whole output.

Key words: Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA); nitrogen; phosphorus; deposit

[收稿日期] 2013-10-15

[修回日期] 2014-01-20

[基金项目] 世界自然基金会(香港)华南湿地项目资助

[作者简介] 黄红宣(1966—),女,高级工程师,讲师.并列第一作者:吴维鹏(1988—),男,主要从事生态系统物流能流研究, E-mail: 449281912@qq.com.

0 引言

生态综合养殖 (Integrated Multi-Trophic Aquaculture, IMTA) 把投饵养殖品种和非投饵养殖品种混养在同一系统中, 充分利用水体空间和生态位; 能够最大限度地利用投入系统中的营养物质和能量, 从而实现养殖效率或生产效率的最大化, 以及养殖环境影响的最小化 (实现原位生态修复)^[1]. 生态养殖模式通过利用生物不同的生态位来增加养殖区生态系统的结构和空间层次性, 从而减少对环境的负面影响, 实现水产养殖业的可持续发展.

氮 (N)、磷 (P) 收支能够揭示水体中重要营养物质氮、磷的来源和归宿, 是评价养殖池塘中氮和磷的重要性、转化效率及养殖污染程度的有效方法^[2-6]. 在以缢蛏 (*Sinonovacula constrzcta*) 为主的生态综合养殖池塘中, 缢蛏的生物沉积作用 (biodeposits) 能够对养殖系统的营养盐循环产生重要影响. Jordon^[7]在对 England 盐沼地泻湖的贻贝种群的 N 收支情况的研究中发现贻贝吸收滤食颗粒氮的一半, 另一半颗粒氮作为粪便 (faecal pellets) 和假粪 (pseudofaecal) 沉积下来; Kuenzler^[8]研究了 Georgia 潮间带盐泽区贻贝种群磷的收支情况, 结果表明种群内大部分磷 (94%) 形成粪便, 最终以生物沉积方式沉积于底泥中. 国内专门对缢蛏生物沉积及养殖池塘氮磷沉积的研究较少.

本研究通过测定以缢蛏为主的生态综合养殖池塘沉积物中的 N、P 含量和海水界面通量, 并利用室内模拟实验估算出缢蛏生物沉积作用所产生的 N、P, 同时运用 N、P 平衡方程, 分析沉积作用在池塘 N、P 输出中所占的比例以及沉降导致池塘沉积物中 N、P 的累积可能给生态综合养殖带来的影响, 为进一步探究提高养殖过程中 N、P 利用率的方法提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验过程

实验选用位于云霄漳江口南岸的中漳水产公司的养殖池塘. 采样池塘面积 $S_{\text{池}} = 0.5 \text{ hm}^2$, 水深 50 ~ 60 cm, 采样期间水温 19 ~ 25 °C、盐度 18 ~ 26. 两口池塘为一个养殖组 (如图 1 所示), 养殖周期约为 240 d, 分贝类养殖池 (B 池) 和饵料藻类培育池 (A 池). 在 B 池养殖缢蛏, 在 A 池养殖凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 和罗非鱼 (*Oreochromis niloticus aureus*). 每天向 A 池投放对虾饲料和小杂鱼, 同时投入碳酸氢铵和过磷酸钙, 用于培养饵料藻类. 待 A 池水体成浓黄褐色后, 将富含藻类的海水由 B 池排入 A 池, B 池重新纳入海水, 待 B 池水色变澄清即大部分藻类被缢蛏摄食后, 将 B 池水通过水渠排入海区, 对 B 池进行干露.

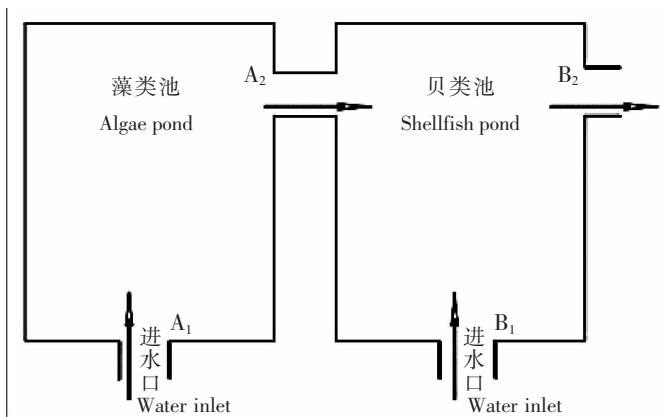


图 1 生态综合养殖池塘结构模式图

Fig.1 The structure of IMTA ponds

1.2 实验方法

1) 池塘底泥采集

于 2012 年 3 月中旬至 5 月底共 90 d 进行 3 次采样. 分别在 A 池和 B 池的 4 个角及池塘中央选取合适位置, 分别设立为采样点, 标上编号, 用长 500 mm、内径 90 mm 的自制 PVC 采样管在每个样点四周 1 m² 范围内采集底泥—池塘水原样, 底泥采集深度约 40 cm, 将柱状样按深度 10、20、30、40 cm 切割成 10 cm 的样段, 每个样段冷冻干燥研磨混匀后待测.

2) 自然沉降沉积物采集

在 A、B 池选择适当位置放一定数量的用玻璃培养皿制成的面积为 78.5 cm² 的沉积物捕集器, 使

捕集器底部正好接触底泥表面,放置 24 h 后取出,将捕集器中采集到的沉积物用 Milli-Q 水冲洗过滤到滤纸膜上,用冷冻干燥器干燥后称重测定。

3) 底泥及沉积物总氮 (total nitrogen, TN)、总磷 (total phosphorus, TP) 的测定

底泥及沉积物样品用冷冻干燥器干燥。冻干后的样品用玛瑙研钵研磨后过 100 目筛,低温保存,待分析^[9]。TN 测定将低温保存的样品用蒸馏水脱盐在烘箱中 (70 °C) 烘干后研磨成粉过 60 目分样筛^[10],用元素分析仪 (Elementar Vario EL III) 测定 TN。TP 采用酸熔—钼锑抗分光光度法分析^[11]。

4) 上覆水与间隙水采集和测定

在藻类池和贝类池分别选取一个池水搅动较小的采样点,将自制聚丙烯柱式采泥器垂直插入底泥中取底泥 15 cm 左右,静止后用虹吸法分离出上覆水。底泥按照 5、10、15 cm 的深度分割成 3 个样段,每个样段切割成 2 cm 装入离心管中,以 5000 r/min 离心 20 min,虹吸法吸取上清液即为间隙水样品。用 Milli-Q 将间隙水和上覆水稀释后进行 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的测定分析,方法参照《海洋调查规范第 4 部分:海水化学要素调查》(GB12763.4—2007)^[12]。

5) 沉积物—海水界面扩散通量分析方法

沉积物海水界面氮、磷营养盐的通量估算采用 Fick 第一定律^[13]: $F = \varphi \times D_s (\partial C_i / \partial x)$, $D_s = \varphi^n D_0$ ($\varphi < 0.7$ 时 $n = 1$; $\varphi \geq 0.7$ 时 $n = 2$), 其中, F 为沉积物—海水界面营养盐扩散通量 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), φ 表示沉积物孔隙度, $\partial C_i / \partial x$ 为界面浓度梯度,一般可用某一深度处间隙水与上覆水浓度差 C/x 估算, D_s 为总扩散系数, D_0 为理想溶液的扩散系数。

6) 缢蛏生物沉积作用所产生的氮、磷测定

取养殖池内一定数量的缢蛏用人工海水反复冲洗后称重,再放入一只装满过滤海水 (0.45 μm 醋酸纤维脂膜过滤) 的塑料桶中,塑料桶直径为 30 cm、高为 50 cm。放置一昼夜后取出缢蛏,取 200 mL 桶中水过滤到经 450 °C 马弗炉灼烧的 GF/F 膜上,收集沉积物用蒸馏水脱盐并烘干 (65 °C, 60 ~ 72 h) 测定 TN、TP。贝类池中缢蛏生物量的估算:在池中随机选取 4 个位点,取样范围大小为 30 cm、深度为 40 cm,称重及计算按照《海洋监测规范 (GB 17378.7 - 1998)》^[14] 规定的方法进行。

2 实验结果

2.1 藻类池、贝类池的沉积速度以及自然沉降一昼夜累积的 N、P

沉积物捕获器面积为 $S_{\text{捕}} = 78.5 \text{ cm}^2$, 实验期内 A 池沉积物捕获器 24 h 累积沉积物平均为 $m_{\text{沉A}} = 0.35 \text{ g}$, B 池沉积物捕获器 24 h 累积沉积物平均为 $m_{\text{沉B}} = 0.11 \text{ g}$ 。则 A 池沉积速度为 $44.59 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; B 池沉积速度为 $14.01 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。测定总磷时取处理后沉积物 0.5 g 用超纯水稀释至 100 mL, 获得 A 池数据为 $C_A = 1.5 \text{ g/m}^3$, B 池数据为 $C_B = 0.9 \text{ g/m}^3$ 。元素分析仪测得 A 池沉积物总氮的质量分数 $\omega_A = 0.086\%$, B 池沉积物总氮的质量分数 $\omega_B = 0.037\%$ 。则 A、B 池自然沉降 24 h 累积的 N、P:

$$m_{\text{磷}} = m_{\text{沉}} \times (C \times 10^{-4} \div 0.5) \div S_{\text{捕}} \times S_{\text{池}};$$

$$m_{\text{氮}} = m_{\text{沉}} \times \omega \div S_{\text{捕}} \times S_{\text{池}};$$

$$m_{\text{磷A}} = 0.35 \times (1.5 \times 10^{-4} \div 0.5) \div (7.85 \times 10^{-3}) \times 5000 = 66.9 (\text{g});$$

$$m_{\text{氮A}} = 0.35 \times 0.086\% \div (7.85 \times 10^{-3}) \times 5000 = 191.7 (\text{g});$$

$$m_{\text{磷B}} = 0.11 \times (0.9 \times 10^{-4} \div 0.5) \div (7.85 \times 10^{-3}) \times 5000 = 12.6 (\text{g});$$

$$m_{\text{氮B}} = 0.11 \times 0.037\% \div (7.85 \times 10^{-3}) \times 5000 = 25.9 (\text{g}).$$

2.2 藻类池、贝类池底泥 TN、TP 含量的垂直分布

3、4 月 TN、TP 含量的测定值,取平均值后计算得养殖池塘不同深度氮、磷含量变化。由图 2 可知藻类池中底泥的 TN、TP 含量在 10 ~ 40 cm 呈现随着深度的增加而增加的趋势,贝类池底泥中 TN、TP 含量则未出现此种趋势。

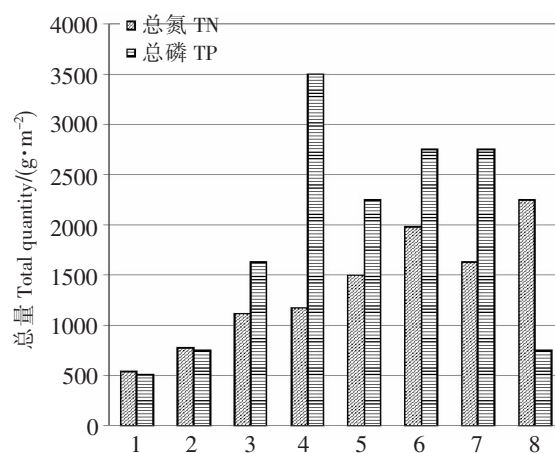
2.3 沉积物-海水界面氮、磷的扩散通量

扩散通量计算用 Fick 第一定律, 其中池塘孔隙度用实际测量的值, $\varphi = 0.5$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 在理想溶液 25 °C 下的扩散系数分别为 19.9×10^{-6} , 19.1×10^{-6} , 19.8×10^{-6} , $7.45 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [15], 由于水土界面物质交换主要发生在沉积物表层 0 ~ 10 cm 范围内 [16], $\partial C_i / \partial x$ 根据沉积物 0 ~ 10 cm 间隙水的平均浓度与上覆水浓度之差代替微分估算, 采用 Fick 第一定律计算得养殖组一天的 N、P 释放量为 (见表 1):

$$m_{\text{氮释放}} = (9.69 + 7.67 + 2.44 + 2.11 + 9.33 + 8.21) \times S_{\text{池}} = 197.250(\text{g}),$$

$$m_{\text{磷释放}} = (1.85 + 1.38) \times S_{\text{池}} = 16.150(\text{g}).$$

试验期内 (90 d) 池塘沉积物底泥通过扩散向上层池水输入的 N、P 分别为: $m_{\text{氮释总}} = 197.250 \times 90 \approx 17753(\text{g})$, $m_{\text{磷释总}} = 16.150 \times 90 \approx 1453(\text{g})$.



说明: 1—4 分别为藻类池 10、20、30、40 cm, 5—8 分别为贝类池 10、20、30、40 cm.

Notes: 1—4 indicated algae pond 10、20、30、40 cm; 5—8 indicated shellfish pond 10、20、30、40 cm.

图 2 养殖池塘底泥沉积物总氮总磷含量

Fig.2 TN and TP of sediments in two ponds

表 1 养殖池塘沉积物-海水界面扩散通量

Tab.1 The sediment-water interface diffusion flux of two ponds

项目 Item	(mg · m ⁻² · d ⁻¹)			
	NO ₃ ⁻ - N	NO ₂ ⁻ - N	NH ₄ ⁺ - N	PO ₄ ³⁻ - P
藻类池 Algae pond	9.69	2.44	9.33	1.85
贝类池 Shellfish pond	7.67	2.11	8.21	1.38

2.4 贝类池缢蛭活动一昼夜累积的 N、P

经测定, 贝类池的缢蛭活动一昼夜生物沉积量 (干品, 包括壳) 为 5.88 mg/g, 年沉积量约为 2.12 g/g. 缢蛭生物沉积作用产生的沉积物总磷质量比为 1.00 mg/g, 总氮质量比为 4.20 mg/g, 即氮的 0.42% 和磷的 0.1% (质量分数). 贝类池缢蛭总生物量经过估算为 $6.89 \times 10^5 \text{ g}$, 则贝类池缢蛭活动一昼夜累积的 N、P 分别 $m_{\text{SN}} = 1.70 \times 10^4 \text{ mg}$, $m_{\text{SP}} = 4.05 \times 10^3 \text{ mg}$. 0.5 hm² 的缢蛭 90 d 可产生约 364.5 kg 的粪便和假粪 (干品), 含有 N、P 分别为 1.53 kg 和 0.36 kg.

2.5 养殖组在实验期间 N、P 净沉积量

养殖组实验期间 (90 d) N、P 净沉积量 M_{N} 、 M_{P} 分别为

$$M_{\text{N}} = (m_{\text{SN}} + m_{\text{氮A}} + m_{\text{氮B}} - m_{\text{氮释放}}) \times 90 = (17 + 192 + 25.9 - 197) \times 90 = 3411(\text{g})$$

$$M_{\text{P}} = (m_{\text{SP}} + m_{\text{磷A}} + m_{\text{磷B}} - m_{\text{磷释放}}) \times 90 = (4.05 + 12.6 + 66.9 - 16.2) \times 90 = 6061.5(\text{g}).$$

根据生态综合养殖池塘的管理模式得出一个养殖周期 N、P 物质平衡模式可表示为: 化肥 + 饲料 + 幼苗 + 动力输入 + 底泥释放 + 其他 = 成体收获 + 底泥沉积 + 动力输出 + 其他.

实验期间定期向藻类池内投入氮肥和磷肥, 期间还向水体中投放饲料, 估算出 90 d 水体中的 N、P 总输入见表 2, 实验期间净沉积量 M_{N} 、 M_{P} 占 N、P 输出量 (质量) 的 2.2% 和 5.8%.

表 2 养殖池塘 N、P 输入

Tab.2 The input of N and P in two ponds (kg · hm⁻²)

项目 Item	N	P
化肥 Chemical fertilizer	87.5	72.0
鱼浆 Surimi	7.7	1.1
饲料 Fodder	36.8	17.5
进水 Inflow	19.7	12.0
罗非鱼苗 Tilapia fry	1.8	1.2
总计 Total	153.5	103.8

3 讨论

3.1 藻类池与贝类池底泥沉积物 N、P 的来源分析及分布

沉积物中 N 和 P 的形态分布受多种因素的影响,有时甚至几种环境因素会共同产生作用。而随着深度的改变,控制 N 和 P 形态的关键因子会发生变化,也有报道说其中沉积速率的影响显著^[17]。据文献 [18–20],在沉积物表层,无机 N 和 P 的含量一般都随着深度的增加而增加,在次表层则一般趋于稳定或变化较小,而有机 N 和 P 的垂直分布情况正好相反,并且随着深度的增加,这种对应的分布性更趋明显。本实验养殖场藻类池与贝类池的使用年限均已超过 20 年。由于定期向藻类池投入无机氮肥和磷肥,大量的无机氮、磷透过沉积渗漏作用渗漏到底泥中,使藻类池中底泥 N、P 逐年累积,而池塘表层沉积物的 N、P 通过扩散作用扩散到上覆水中又通过每天的换水排水流失,从而使池塘表层沉积物 N、P 含量较低,底泥的 N、P 含量在 10~40 cm 呈现随着深度的增加而增加的趋势。贝类池由于每年投放缢蛭苗和收获成体缢蛭时都是人工下池作业,再加上周期性的人为翻晒底泥及缢蛭的生物活动,使得贝类养殖池底泥上下搅动比较剧烈,N、P 含量随深度变化无规律。

3.2 缢蛭生物排泄作用对养殖池塘 N、P 循环的影响

滤食性双壳贝类具有很强的滤食能力,它们能够从水体中过滤或通过水动力学摄食大量细小的颗粒物(如浮游藻类、微生物、贝类幼虫和中型浮游动物及其他碎屑),然后对食物进行筛选并最终排泄以粪和假粪的形式沉积下来。有研究表明从滤食性双壳贝类排出的粪便和假粪被粘膜分泌的粘液粘在一起,比没有粘在一起的颗粒物沉积速度明显要快^[21]。本实验组测定表明实验期内贝类池的缢蛭活动一昼夜生物沉积(干品,包括壳)为 5.88 mg/g,年沉积量约为 2.12 g/g,含有 N 0.42% 和 P 0.1% (质量分数),0.5 hm² 的缢蛭 90 d 可产生约 364.5 kg 的粪便和假粪(干品),含有 N、P 分别为 1.53 kg 和 0.36 kg。国外对贻贝的生物沉积有较多报道,Kautsky&Evans^[22]在北 Baltic 海对贻贝生物沉积速率的测定结果显示每克包括壳重的贻贝每年生物沉积为 1.76 g,这与本实验对于缢蛭的测定结果相近;Jaramillo 等^[23]用现场测定法对南智利 Queule 河口湾潮下带贻贝 *Choromytilus chorus* 和 *M. chilensis* (密度为 250~300 ind/m²,壳高 75~90 mm) 每年的平均生物沉积速率分别为 271 和 234 g·m⁻²·a⁻¹ (干品),前者生物沉积物中含 22% 有机物、6.4% C 和 0.3% N,后者含有机质 21%、C 6.0% 和 N 0.4% (质量分数)。本实验生物沉积物中的 N、P 含量均高于上述报道,分析可能是养殖池塘投放过多肥料及饲料导致的。

滤食性贝类的生物沉降使养殖水域具备了营养滞留机制,减少了养殖区内颗粒物的外移^[24],大量的沉降物构成了丰富的营养物库,经矿化作用和再悬浮后又可重新进入水体营养盐循环。然而这种营养滞留机制却没有得到有效的利用。以本实验养殖池塘为例,贝类池每天纳入排出藻类池水两次,通过矿化作用和再悬浮后进入水体的营养盐 N 以 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N 为主,P 则以 PO₄³⁻-P 为主,这些营养盐通过扩散作用进入上覆水,随后通过水交换直接排入海区,不仅造成了这些生源要素的浪费,还加剧了养殖区海水的富营养化。

4 结论

在本研究中,生态综合养殖池塘试验期内 N、P 净沉积量分别为 6061.5 g 和 3411 g,分别占 N、P 总输出的 2.2% 和 5.8% (质量分数)。贝类池试验期内可产生约 364.5 kg 的粪便和假粪(干品),其中含有 N、P 分别为 1.53 kg 和 0.36 kg。藻类池中底泥的 N、P 含量呈现随着深度的增加而增加的趋势,而贝类池底泥中 N、P 含量则未出现此种趋势,分析是由于缢蛭的养殖管理方式导致的。虽然生态综合养殖模式在一定程度上提高了 N、P 的利用率,但从测定数据中可以看出藻类池和贝类池底泥中的 N、P 含量都较大且在沉积物-水体界面发生迁移转化。试验期内池塘沉积物底泥中的 N、P 通过扩散向上层池水输入分别达 17.753 kg 和 1.454 kg,这些营养物质在贝类池短暂停留后最终几乎全通过水渠直接排入养殖区的近海中。由于海水养殖区大多位于近岸滩涂或港湾,水交换条件差,富

含 N、P 的养殖废水很容易造成局部海洋环境的恶化, 还很可能导致赤潮的发生, 威胁养殖生物的安全. 因此, 探索出能够更高效利用 N、P 等营养物质的养殖模式, 通过尽可能地提高 N、P 利用率来降低养殖成本, 减少养殖污染是进一步研究的重点. 在实践中可根据实际情况, 科学地选择不同养殖品种进行组合, 并对富含营养物质的养殖废水再次合理利用, 真正达到生态综合养殖的目的和效果.

[参 考 文 献]

- [1] 朱小明, 林伟山, 马冬艳, 等. 池塘生态综合养殖结构的调查分析 [M]. 北京: 海洋出版社, 2011: 602-609.
- [2] GREEN B W, BOYD C E. Chemical budgets for organically fertilized fish ponds in the dry tropics [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1995, 26(3): 284-296.
- [3] 王彦波, 岳斌, 许梓荣. 池塘养殖系统氮、磷收支研究进展 [J]. 饲料工业, 2005, 26(18): 50.
- [4] DANIELS H V, BOYD C E. Chemical budgets for polyethylene lined brackish water ponds [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1989, 20(2): 53-60.
- [5] 齐振雄, 李德尚, 张曼平, 等. 对虾养殖池塘氮、磷收支的实验研究 [J]. 水产学报, 1998, 22(2): 124-128.
- [6] 高杉, 吴立新, 姜志强, 等. 牙鲆和贝类混养池塘中氮、磷收支的研究 [J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(3): 204.
- [7] THOMAS E JORDEN. A nitrogen budget of the ribbed mussel, *Geukensia Demissa*, and its significance in nitrogen flow in a New England salt marsh [J]. Limnology and Oceanography, 1982, 27(1): 75-90.
- [8] EDWARD J, KUENZLER. Phosphorus budget of a mussel population [J]. Limnology and Oceanography, 1961, 6(4): 400-415.
- [9] 黄健骊. 筲筴湖表层沉积物碳氮磷含量、微生物多样性及其相关性研究 [D]. 厦门: 厦门大学海洋与地球学院, 2010.
- [10] 李廷友, 林振山. 海水围塘混合养殖生态系统 NP 平衡的研究 [J]. 井冈山大学学报, 2010, 31(2): 32-35.
- [11] 王兆群, 田超, 黎刚. 洪泽湖沉积物中总磷的分析 [J]. 仪器仪表与分析检测, 2009(1): 40-43.
- [12] GB/T 12763. 4—2007 海洋调查规范 第 4 部分: 海水化学要素调查 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [13] 宋金明. 中国近海沉积物—海水界面化学 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1997.
- [14] 国家海洋局. GB 17378. 7—1998 海洋监测规范 (近海污染生态调查和生物监测) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [15] LERMAN A. Geochemical processes: water and sediment environments [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 1979.
- [16] 秦伯强, 朱广伟, 张路, 等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法 [J]. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 2005, 35(S2): 33-44.
- [17] 岳维忠, 黄小平, 黄良民, 等. 大型藻类净化养殖水体的初步研究 [J]. 海洋环境科学, 2004, 23(1): 14-16.
- [18] 张海生, 王成厚. 浙江近海沉积物中磷的存在形态及其分布特征 [J]. 东海海洋, 1984, 2(4): 56-60.
- [19] 顾德宇, 汤荣坤. 大亚湾沉积物间隙水的无机磷硅氮营养盐化学 [J]. 海洋学报, 1995, 17(5): 73-80.
- [20] 侯立军, 刘敏, 许世远, 等. 长江口岸带柱状沉积物中磷的存在形态及其环境意义 [J]. 海洋环境科学, 2001, 20(2): 7-12.
- [21] NEWELL C R, WILDISH D J, MCDONALD B A. The effects of velocity and seston concentration on the exhalant siphon area, valve gape and filtration rate of the mussel (*Mytilus edulis*) [J]. Exp Mar Biol Ecol, 2001, 262(1): 91-111.
- [22] KAUTSKY N, EVANS S. Role of biodeposition by *Mytilus edulis* in the circulation of matter and nutrients in a Baltic coastal ecosystem [J]. Mar Ecol Prog Ser, 1987, 38(3): 201-212.
- [23] JARAMILLO E, BERTRAN C, BRAVO A. Mussel biodeposition in an estuary in southern Chile [J]. Mar Ecol Prog Ser, 1992, 82(1): 85-94.
- [24] 季如宝, 毛兴华, 朱明远. 贝类养殖对海湾生态系统的影响 [J]. 黄渤海海洋, 1998, 16(1): 21-27.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 张子平)